

# 北方河流动态水环境容量分析与计算

姜欣<sup>1</sup>, 许士国<sup>1①</sup>, 练建军<sup>1,2</sup>, 孟庆国<sup>3</sup> (1. 大连理工大学建设工程学部水环境研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 3. 哈尔滨市水务局, 黑龙江 哈尔滨 150076)

**摘要:** 由于自然条件的季节变化,水环境容量具有明显的时间动态特性,在单一的设计水文条件下计算的水环境容量并不能反映这一变化。在阐明水环境容量时间动态特性的基础上,提出一种动态水环境容量的计算方法,主要是利用合适的水质模型,在动态水文设计条件下,计算河流功能区的水环境容量。以哈尔滨市阿什河为例,利用丹麦 DHI MIKE11 软件,构建哈尔滨阿什河西泉眼水库以下河段水量水质模型,采用一维水环境容量模型计算功能区水环境容量。结果表明,阿什河各功能区冰封期水环境容量要远远小于非冰封期。此外,通过比较各月不同水文设计条件下水环境容量的大小,得到各功能区每个月水环境容量的上下控制线,可为阿什河污染物排放总量控制提供可行的参考。

**关键词:** 水环境容量; 动态; 阿什河; 冰封期

**中图分类号:** X26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2013)04-0409-06

**Analysis and Calculation of Dynamic Water Environmental Capacity of Rivers in North China.** JIANG Xin<sup>1</sup>, XU Shi-guo<sup>1</sup>, LIAN Jian-jun<sup>1,2</sup>, MENG Qing-guo<sup>3</sup> (1. Institute of Water and Environmental Research, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 3. Harbin Water Resources Bureau, Harbin 150076, China)

**Abstract:** As a result of the succession of the four seasons in nature, water environmental capacity is obviously characterized by temporal dynamic. However, the use of a simple hydraulic design in calculating water environment capacity is unable to reflect the dynamic variation. Based on characterization of the temporal dynamic of the water environmental capacity, a new method, including a suitable water quality model and a dynamic hydraulic design, was put forth for calculating. Using this method, a numerical water quality model was established with the aid of the hydrodynamic (HD) & advection-dispersion (AD) module of the DHI MIKE11 software for the downstreams of the Ashi River after the Xiquanyan Reservoir in Harbin. Water environmental capacities of its various function zones were worked out using the one-dimensional water environmental capacity model. Results show that the COD and NH<sub>3</sub>-N water environmental capacities of various function zones were much lower in the frozen period (from November to next March) than in the non-frozen period (from April to October). Furthermore, by the comparison between months and between various hydraulic conditions in water environment capacity, both the maximum and minimum water environmental capacity control lines were obtained for every function zone every month, which may serve as reference for total volume control of pollution discharge in the Ashi River.

**Key words:** water environmental capacity; dynamic; Ashi River; frozen period

在使用功能不受破坏条件下,水功能区所能接纳污染物的最大量即为功能区的水环境容量。水环境容量是水功能区水质目标管理的基本依据,是水资源保护规划的主要约束条件,是实施水污染物总量控制的依据,也是水环境管理的基础<sup>[1]</sup>。2011年中央一号文件中明确提出实施最严格水资源管理制度,确立“三条红线”,其中水功能区限制纳污红线取决于水环境容量,因此功能区水环境容量成为影响经济发展和社会和谐稳定的重要因素<sup>[2]</sup>。

我国的北方河流,特别是东北地区,年内水量分配极不均匀,各月水文条件不同,且存在长达4个

多月的冰封期,水温较低,自净能力下降。已有常规水环境容量计算方法多基于单一设计水文条件<sup>[3-5]</sup>。然而实际上,由于北方河流的水环境容量并不是一个稳定的阈值,而是随水文条件的变化而不断变化的,故在全年以单一水环境容量来限制污染入河量,并不能满足北方河流的水环境管理要

收稿日期: 2012-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(51279022); 国家重点基础研究发展规划(2013CB430403)

① 通信作者 E-mail: sgxu@dlut.edu.cn

求。因此,该研究引入动态水环境容量概念,对北方河流不同功能区段不同设计水文条件下的水环境容量进行计算和分析,为污染物入河总量控制方案的制定提供可行的技术依据。

## 1 水环境容量的时间动态特性

影响水环境容量的因素很多,主要包括水域特征、水环境功能要求、污染物特性和排污方式4个方面<sup>[6]</sup>。不同的河流或者同一河流的不同功能区具有不同的水环境容量。而对于特定的河流,在水功能区水质目标不变的情况下,影响功能区水环境容量的主要因素为水文特征、自净能力和排污口排污方式。

北方河流全年流量分配极其不均匀,夏季汛期流量远大于冬季冰封期,流量越大,水环境容量越大,所以水环境容量是随季节变化而动态变化的。常规河流水环境容量的计算,多在单一设计流量前提下进行,通常将90%保证率月平均流量或近10a最枯月平均流量作为设计流量。如果以单一设计流量条件下的水环境容量来限制丰水期污染物排放量,会导致水环境容量浪费,增加污水处理成本。

北方地区,尤其在东北地区,存在长达3~4个月的冰封期。在冬季冰封条件下,流量减少,水流速度变慢,污染物稀释扩散作用降低;同时河面被冰层覆盖,水体与空气隔绝,复氧能力大大降低;此外,水温降低,微生物的降解活性也降低<sup>[7]</sup>。因此,河流的自净能力减弱很多,冰封期水环境容量应小于非冰封期<sup>[8]</sup>。如果以非冰封期自净能力计算水环境容量,显然在冰封期是不安全的,容易造成冰封期水质恶化,水污染问题加剧,因此从河流自净能力方面来说,河流的水环境容量是随季节变化而动态变化的。

污染物的排污位置和排污方式对水环境容量影响也很大。排污口位置是相对固定的,但是功能区内的排污口往往很多。常规计算方法常将多个排污口位置概化至权重概化重心<sup>[6]</sup>或河流中段<sup>[3,9-10]</sup>。排污口污染物排放浓度和水量在时间上是不断变化的,有些排污口或支流在冬季甚至会完全冰封,因此,河流的水环境容量是随时间变化而动态变化的。

综上所述,由于影响功能区水环境容量的主要因素存在时间上的变化,故功能区水环境容量具有明显的时间动态特性,需针对实际背景条件下的水环境容量变化规律,研究相应的分析与计算方法。

## 2 动态水环境容量计算方法

基于对水环境容量时间动态特性的分析,提出一种动态水环境容量的计算方法,即按不同时段(月)采用不同设计水文条件,利用合适的水质模型,选择相应的设计参数,按照各水功能区的水质目标要求,计算出各时段的功能区水环境容量,以反映水环境容量在1a中的动态变化,为污染物入河总量控制提供一种变量总量控制方案。

用于水环境容量计算的水质模型较多,其中丹麦DHI MIKE11模型广泛地用于模拟河流的流量、水位、水质和泥沙输送等<sup>[11-13]</sup>。该软件的对流扩散(AD)模块可作为一个简单的水质模型,模拟具有恒定衰减系数的非保守物质在水体中的对流和扩散运动。

采用MIKE11软件的HD+AD模块,建立研究河段的水量水质模型,模拟计算河道中污染物的时空分布,得到各功能区控制断面COD和氨氮的浓度( $C_{\text{控制}}$ ),然后采用一维水环境容量模型计算各功能区不同时段设计水文条件下的COD和氨氮自然水环境容量。功能区水环境容量( $M, \text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ )计算公式为 $M = 86.4 \times (C_s/\alpha - C_{\text{控制}}) \times Q, \alpha = \frac{Q}{Q+q}$ 。其中, $Q$ 为上游断面设计流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $q$ 为区间旁侧入流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\alpha$ 为稀释流量比;  $C_s$ 为功能区水质目标,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C_{\text{控制}}$ 为模拟计算得到的功能区下游断面水质,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

## 3 计算实例

阿什河为松花江右岸的一级支流,其中西泉眼水库以下长140km,流域面积2400 $\text{km}^2$ ,该河段蛇曲发育,河槽宽25~60m,比降约1/2500,水深1~3m。该段阿什河主要支流有12条,右岸有大石头河、小石头河、玉泉河、海沟河、小黄河和白菜大沟,左岸有柳树河、梁家沟、樊家沟、怀家沟、庙台沟和信义沟(图1)。从源头到西泉眼水库,阿什河一路清澈透明,然而进入阿城城区后,水质开始变差,常年处于IV~V类水状态,特别是阿什河左岸一级支流信义沟,为天然雨水与沿岸企业居民生活污水汇集水沟,现已成为一条主要的排污沟,对阿什河水水质影响较大。

### 3.1 水质模型参数确定

水质模型参数的确定和取值是否符合客观实际,关系到计算结果是否准确合理。直接反映水功能区水环境容量动态变化的参数是计算水功能区

动态环境容量的关键参数,主要有设计流量、综合降解系数( $K$ )和排污口位置。该模型建立所需资料

和参数主要由哈尔滨市水务局提供。

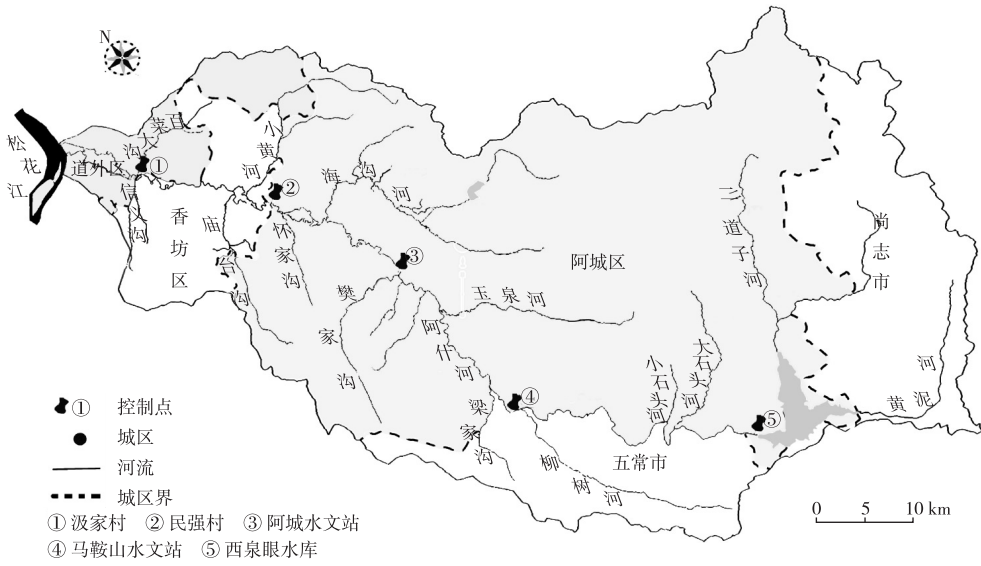


图1 阿什河水系图

Fig.1 The Ashi River water system

### 3.1.1 水功能区划及水质目标

水功能区划是根据水资源不同的自然条件、功能要求和开发利用现状划分功能区,不同的功能区具有不同的水质管理目标。

阿什河功能区共划分为3个一级功能区:阿城市源头水保护区、阿城市保留区和阿城市开发利用区,水质标准分别设定为Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类<sup>[14]</sup>。在该研

究区段内,共有2个水功能一级区,即阿什河阿城市保留区和阿什河阿城市开发利用区,阿城市开发利用区有3个水功能二级区,分别是阿什河阿城市农业用水区、阿什河哈尔滨市排污控制区和阿什河哈尔滨市过渡区。虽然排污控制区没有水质目标值,但为满足下一功能区的水质要求,也采用Ⅳ类标准。阿什河水功能区划及水质目标见表1。

表1 阿什河水功能区划及水质目标

Table 1 Various water function zones of the Ashi River and their respective water quality targets

水功能一级区名称	水功能二级区名称	范围		长度/ km	水质 目标	上游 水质
		起始断面	终止断面			
阿什河阿城保留区	—	西泉眼水库	马鞍山站	39.2	Ⅲ	Ⅱ
阿什河阿城开发利用区	阿什河阿城农业用水区	马鞍山站	民强村	55.8	Ⅳ	Ⅲ
	阿什河哈尔滨市排污控制区	民强村	汲家村	20.4	Ⅳ	Ⅳ
	阿什河哈尔滨市过渡区	汲家村	入松花江口	17.6	Ⅳ	Ⅳ

### 3.1.2 河网和断面文件

河网文件是模型的基础,将哈尔滨市水务局提供的阿什河流域CAD图加载至MIKE11河网编辑器作为底图,按照底图中的阿什河河道走向,连接各点生成河网文件(图2)。

阿什河断面资料由哈尔滨市水务局提供,经过格式处理后形成模型断面文件。阿什河断面是典型的复式断面,河道糙率采用分段设置,西泉眼水库断面到马鞍山水文站断面主河槽糙率设为0.035,马鞍山水文站断面到阿城水文站断面主河槽

糙率设为0.033,阿城水文站断面到入松花江口断面主河槽糙率设为0.03。西泉眼水库断面到马鞍山水文站断面滩地糙率设为0.1,马鞍山水文站断面到民强村断面滩地糙率设为0.08,民强村断面到入松花江口断面滩地糙率设为0.07。

### 3.1.3 边界条件和设计流量

边界条件是模型计算的先决条件。上游边界为各功能区的初始断面,采用不同时段90%保证率设计流量,下游边界为阿什河入松花江口边界。受松花江回水影响,保持116 m常水位,因此采用

116 m 水位作为下游边界条件。水质边界条件采用前一个功能区的水质目标作为待计算功能区的上游边界条件。

阿什河阿城水文站保存有 1954—2008 年长系列水文资料,选用实测月平均流量作为设计流量的

计算系列;采用水文频率分析法对阿城水文站多年月平均流量以及冰封期(11—次年3月)、非冰封期(4—10月)和各月平均流量进行分析。各功能区控制断面设计流量采用水文比拟法计算得到,阿什河各功能区初始断面 90% 保证率设计流量见表 2。

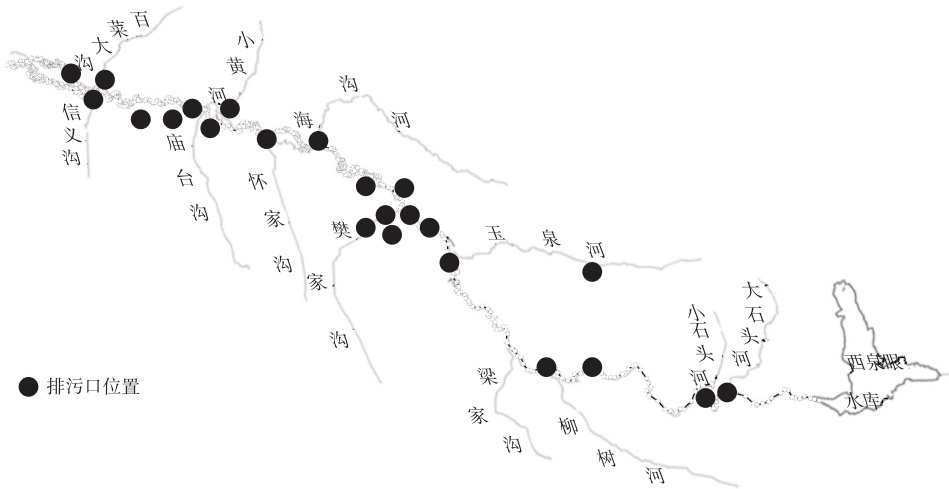


图2 阿什河河网示意图和主要排污口位置示意

Fig. 2 The Ashi River network map with locations of the main waste outlets

表2 阿什河各功能区初始断面设计流量

Table 2 Designed flow at the initial cross-section of each function zone in the Ashi River  $m^3 \cdot s^{-1}$

月份	阿城市保留区	阿城市农业用水区	哈尔滨市排污控制区	哈尔滨市过渡区
1	0.17	0.24	0.45	0.49
2	0.09	0.13	0.25	0.27
3	0.33	0.47	0.88	0.95
4	1.69	2.39	4.51	4.86
5	1.47	2.08	3.93	4.24
6	0.81	1.15	2.16	2.33
7	5.17	7.32	13.81	14.88
8	4.96	7.02	13.24	14.28
9	1.73	2.44	4.61	4.97
10	1.16	1.64	3.09	3.33
11	0.67	0.95	1.78	1.92
12	0.43	0.61	1.15	1.24
月均流量	2.40	3.40	6.41	6.91
非冰封期月均流量	3.61	5.10	9.63	10.38
冰封期月均流量	0.58	0.82	1.55	1.68

3.1.4 控制因子及综合降解系数(K)

阿什河两岸排放的废水主要包括生活污水和工业废水,主要污染物为 COD 和氨氮。根据研究河

段污染源调查和水质评价结果,COD 和氨氮是污染最普遍、最严重的 2 个因子,故确定 COD 和氨氮 2 项指标来表征阿什河水质状况,作为阿什河水环境容量计算的控制因子。

由于阿什河 11 月到次年 3 月为冰封期,冰封期 K 值明显小于非冰封期。采用经验法初选 K 值后,将 2010 年 8 月和 2010 年 11 月实测资料(冰封期 2010 年 11 月率定采用的排污口资料是 2010 年 8 月的资料)作为非冰封期和冰封期条件,通过调整冰封期和非冰封期 K 值,使香坊界、汲家村和阿什河口断面模型模拟值和实测值尽量吻合(表 3),率定得到非冰封期 COD 综合降解系数( $K_{COD}$ )为  $0.07 d^{-1}$ ,冰封期为  $0.04 d^{-1}$ ,非冰封期氨氮综合降解系数( $K_{氨氮}$ )为  $0.07 d^{-1}$ ,冰封期为  $0.03 d^{-1}$ 。

3.1.5 排污口位置

阿什河西泉眼水库以下河段排污口主要位于阿城市农业用水区的阿城城区和哈尔滨市排污控制区,包括阿城市污水处理厂、城南沟、南大沟、阿城市开发区排水管网、庙台沟、十万锭排污口、信义沟和百菜大沟等,排污口参数通过在模型中添加内部边界条件输入。排污口具体位置见图 2。

表3 非冰封期和冰封期综合降解系数率定中各断面实测值和模拟值比较

Table 3 Integrated degradation coefficient calibration in the non-frozen and frozen periods  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

断面	控制因子	8月		11月	
		实测值	模拟值	实测值	模拟值
香坊界	COD	21.20	21.13	19.90	16.80
	氨氮	0.65	0.66	0.30	0.41
汲家村	COD	31.20	39.00	22.30	29.90
	氨氮	0.85	0.98	0.36	0.64
阿什河口	COD	55.60	48.90	35.30	44.70
	氨氮	3.73	3.13	1.56	1.22

### 3.2 动态水环境容量计算结果分析

由表2中60种不同时段90%保证率月平均流量作为模型计算的上游边界条件,利用建立的MIKE11水量水质模型,模拟计算得到4个功能区末端控制断面COD和氨氮浓度( $C_{\text{控制}}$ )。根据2节中公式计算得到各功能区水环境容量,由全年90%保证率月平均流量计算得到各功能区水环境容量全年控制线,由非冰封期和冰封期90%保证率月均流量计算得到分期控制线,由12个月90%保证率月平均流量计算得到分月控制线。以各月3条控制线中最大值和最小值作为水环境容量上、下控制线,得到2条新的控制线(图3)。

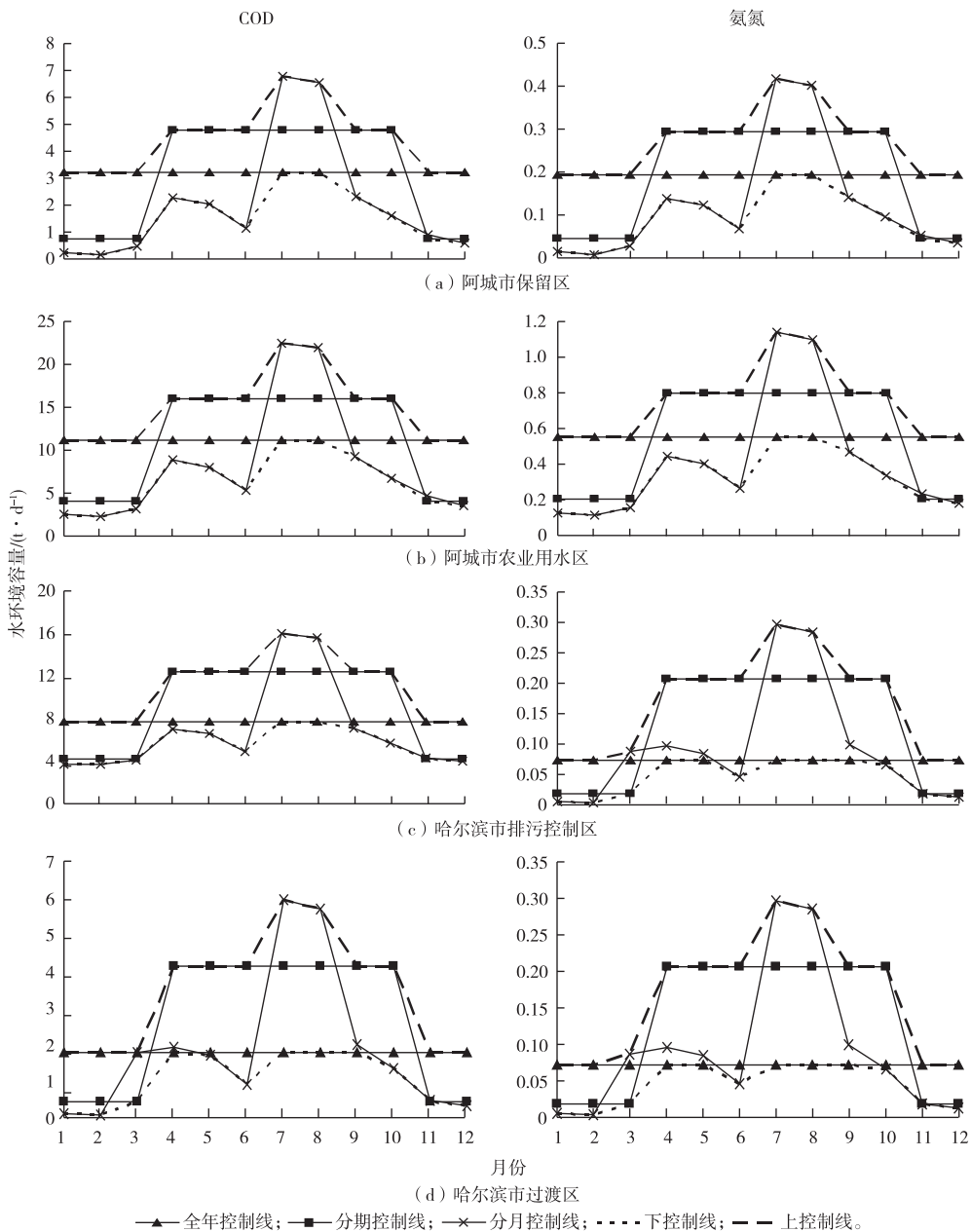


图3 阿什河各功能区水环境容量控制线

Fig. 3 Water environment capacity control lines of the various function zones of the Ashi River

由图3可知,各功能区水环境容量的上、下控制线体现了水环境容量的时间动态特性,每个月的水环境容量呈明显动态变化。

比较各功能区冰封期(11—次年3月)和非冰封期(4—10月)的水环境容量可知,由于冰封期流量远小于非冰封期,且冰封期污染物综合降解系数小于非冰封期,冰封期的水环境容量要远远小于非冰封期,因此要加强冰封期污染物入河总量控制。

同时,比较各月功能区水环境容量可以看出,3和4月变化幅度较大,主要原因为4月上旬冰雪融化,产生“桃花汛”,流量大幅度增加,水环境容量也随之增大。而比较非冰封期各月功能区水环境容量可以发现,6月的水环境容量要小于其他各月,主要原因是6月阿什河两岸农业用水量,农业用水和生态用水矛盾突出,河道生态流量得不到满足,导致各功能区6月水环境容量远小于其他月份。

## 4 结论

(1)从水环境容量的影响因素角度出发,通过对水文特征、河流自净能力和排污口排放方式在时间上的变化分析,明确了水功能区水环境容量的时间动态特性。

(2)提出一种以动态的水文条件为计算基础的动态水环境容量的计算方法,并以东北地区阿什河西泉眼水库以下河段为计算背景,采用 MIKE11 软件,建立水量水质模型,按照全年、分期(冰封期和非冰封期)和分月模拟计算各功能区控制断面 COD 和氨氮浓度,采用一维水环境容量模型计算功能区 COD 和氨氮水环境容量。

(3)计算结果表明冰封期的水环境容量要远远小于非冰封期,6月水环境容量要小于其他非冰封期月份。基于动态水文条件下计算的动态水环境容量更能真实地反映河流功能区水环境容量的动态变化。

(4)比较各月不同计算条件下水环境容量的大

小,得到各功能区水环境容量的上、下控制线,可为阿什河污染物排放总量控制提供可行的参考。若基于偏理想角度考虑,可采用3者最大值作为控制线(上控制线)来控制污染物入河量;若基于偏安全角度考虑,可采用3者最小值作为控制线(下控制线)来控制污染物入河量。

## 参考文献:

- [1] 付意成,徐文新,付敏.我国水环境容量现状研究[J].中国水利,2010(1):27-31.
- [2] 于雷,吴舜泽,徐毅.我国水环境容量研究应用回顾及展望[J].环境保护,2007(3B):46-48,57.
- [3] 杨立中,熊凤,罗洁.涪江绵阳段河流水环境容量测算[J].西南交通大学学报,2007,42(2):151-157.
- [4] 于乃利,王爱杰,单德鑫,等.小流水环境容量测算与容量总量控制[J].东北农业大学学报,2006,37(2):219-224.
- [5] 陈丁江,吕军,金树权.河流水环境容量的估算和分配研究[J].水土保持学报,2007,21(3):123-127.
- [6] 逢勇,陆桂华,吴泽毅,等.水环境容量计算理论及应用[M].北京:科学出版社,2010:5,15.
- [7] 王宪恩,董德明,赵文晋,等.冰封期河流中有机污染物削减模式[J].吉林大学学报:理学版,2003,41(3):392-395.
- [8] 郑秋宏,伍永秋,张永光.冰封期河流中污染物损耗估算模型[J].北京师范大学学报:自然科学版,2006,42(6):615-617.
- [9] 李红亮,王树峰.不同设计水文条件下河北省水功能区纳污能力研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):68-70.
- [10] 杨杰军,王琳,王成见,等.中国北方河流环境容量核算方法研究[J].水利学报,2009,40(2):68-70.
- [11] 刘伟,刘洪超,徐海岩.基于 MIKE11 模型计算河流功能区纳污能力方法[J].东北水利水电,2009,301(8):69-72.
- [12] 马强,陈福容,王颖.基于 MIKE 11 Ecolab 模型的梁滩河流域水污染问题探讨[J].水电能源科学,2011,29(11):33-36,72.
- [13] 黄琳煜,聂秋月,周全,等.基于 MIKE11 的白莲泾区域水量水质模型研究[J].水电能源科学,2011,29(8):21-24.
- [14] DB23/T 740—2003,黑龙江省地表水功能区标准[S].

作者简介:姜欣(1988—),男,山东临沂人,博士生,主要研究方向为水环境污染控制。E-mail: xinjia@mail.dlut.edu.cn